

General Disclaimer

One or more of the Following Statements may affect this Document

- This document has been reproduced from the best copy furnished by the organizational source. It is being released in the interest of making available as much information as possible.
- This document may contain data, which exceeds the sheet parameters. It was furnished in this condition by the organizational source and is the best copy available.
- This document may contain tone-on-tone or color graphs, charts and/or pictures, which have been reproduced in black and white.
- This document is paginated as submitted by the original source.
- Portions of this document are not fully legible due to the historical nature of some of the material. However, it is the best reproduction available from the original submission.

(E85-10010 NASA-CR-168567) REMOTE SENSING
AS A MINERAL PROSPECTING TECHNIQUE
(Instituto de Pesquisas Espaciais, Sao Jose)
20 p HC A02/MF A01 CSCL 08B

N85-11423

Unclas
G3/43 00010



SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DA PRESIDÊNCIA DA REPUBLICA
CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

NASA-CR-168567

E85-10010

RECEIVED BY
NASA STI FACILITY
DATE: *10-20-84*
DCAF NO. *10010*
PROCESSED BY
☒ NASA STI FACILITY
☐ ESA-SDO ☐ AIAA



INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

troles estruturais. Desta forma, a seleção de áreas para localização de depósitos minerais requer um estudo das anomalias ou indícios definidos de trabalhos regionais exploratórios. Conhecendo as potencialidades litológicas de uma área, pode-se suspeitar que uma dada feição estrutural, como uma zona de falha, poderá constituir-se num indício importante de mineralização. As facilidades das imagens de microescala, como as do LANDSAT e radar, em detectar numerosos lineamentos têm despertado a curiosidade de muitos estruturalistas, mesmo em regiões previamente bem mapeadas. Os lineamentos têm sido alvos de numerosos estudos para se deduzirem movimentos tectônicos, particularmente, em pesquisa de recursos minerais, pois muitos dos depósitos estão localizados ao longo de zonas de fraturas. Como os lineamentos nem sempre são facilmente diagnosticados em campo ou por meio de outros métodos, suas presenças em áreas mineralizadas podem adicionar novas informações sobre a distribuição dos depósitos ou sugerir extrapolações para áreas em continuidade às feições identificadas.

Goetz and Rock (1981) comentaram um destes fatos ocorrido em Nevada, onde durante muito tempo debateu-se a existência de faixas mineralizadas. Seis de oito grandes lineamentos delineados em imagens LANDSAT pareciam representar três grandes zonas estruturais que influenciaram a distribuição de depósitos minerais, das quais duas eram previamente conhecidas (Figura 6). Para surpresa geral, a terceira zona estrutural (lineamentos B, C e D) mostrou-se coincidente com "trends" de falhas, feições vulcânicas e concentrações de depósitos minerais, cujas relações não eram anteriormente suspeitadas. Isto enfatiza a importância da integração da análise dos lineamentos com dados de campo e dados geofísicos e geoquímicos regionais. Por exemplo, um lineamento pode representar uma zona de cisalhamento que eventualmente possui uma resistividade diferente das áreas próximas, produzida por cristalização ou calcificação devido às percolações de fluxo dentro da falha. Simples e rápidos serviços de mapeamento de resistividade através da suspeita estrutura poderão confirmar a existência do lineamento ou da falha. Isto pode ser um método simples e útil em pesquisa de água subterrânea de regiões semi-áridas ou áridas, em geral carentes de afloramentos, onde falhas frequentemente controlam os depósitos aquíferos subterrâneos.

A integração do sensoriamento remoto com dados geológicos, geofísicos e geoquímicos é bastante oportuna, dada a dificuldade de identificar os lineamentos no campo ou de explicar certos padrões espectrais anômalos, observados em imagens multiespectrais. Várias técnicas de processamento de imagens digitais (realçamento, filtros, transformações geométricas, etc.) podem ser aplicadas com vantagens sobre a análise convencional dos variados dados de mapas geológicos, geofísicos, geoquímicos e topográficos. Todos estes tipos de dados e formatos podem ser facilmente processados para uma base comum de escala e projeção em formato de imagem digital, que poderão em display de sistemas digitais ser livremente combinados para análises de correlação. As etapas desta integração podem ser genericamente mostradas num fluxograma (Figura 7), baseado nos trabalhos de correlação de dados de sensoriamento remoto de Fisher et alii (1978), Prelat e Lyon (1978), Guinness et alii (1983) e outros.

Uma significativa vantagem do processamento digital de imagens de conjuntos múltiplos de dados é a habilidade de expor as imagens em uma variedade de combinações para interpretação. Depois que os dados forem transformados numa base comum, eles podem ser superpostos, codificados em cores, manipulados por funções numéricas e ampliados. Isto permite ao analista focar as áreas importantes ao seu estudo e fazer rápidas comparações.

Talvez uma das mais frequentes aplicações de dados de sensoriamento remoto à pesquisa mineral tem sido na prospecção de hidrocarbonetos. Em bacias continentais mais jovens, onde a presença de perturbações estruturais são mais patentes, as imagens LANDSAT constituem um método de prospecção quase que direto. Dificuldades maiores são encontradas nas bacias paleozóicas como as brasileiras, as quais exigem a elaboração de metodologias específicas de interpretação. Recentemente, Soares et alii (1981, 1982) e Miranda (1984) formularam um método de análise morfoestrutural a partir de informações extraídas de imagens LANDSAT e de radar para a detecção de áreas estruturalmente favoráveis à acumulação de hidrocarbonetos. O método enfatiza uma análise morfoestrutural da rede de drenagem, o qual consiste basicamente na interpretação das formas e intensidade de estruturação dos elementos anelares, assimétricos e radiais, indicativos de estruturas dômicas e trapas estruturais. Aplicado nas bacias do Paraná e Amazonas, constatou-se a existência de relações preferenciais entre os máximos de frequência dos eixos maiores das anomalias estruturais dômicas e os "trends" de lineamentos, o que pode indicar relações genéticas e de idade. A origem deste método foi motivada pela pouca eficiência dos métodos geofísicos, principalmente sísmica, nas áreas basálticas da bacia do Paraná.

ORIGINAL COPY
OF POOR QUALITY

ABSTRACT

This work presents a review of remote sensing and its application as an alternative technique to mineral resource exploration. Emphasis is given here to the analysis of the three basic attributes of remote sensing, i.e., spacial attribute related to regional structural mapping, spectral attribute related to rock-discrimination and seasonal attribute related to geobotanic anomalies mapping, all of which are employed in mineral exploration. Special emphasis is given to new developments of the Thematic Mapper of the LANDSAT-5, principally with reference to the application of the bands 1,6 and 2,2 μm to map hydrothermally altered rocks and the band of red and blue shift to geobotanical anomalies mapping.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por bens minerais, comparado com o constante decréscimo no fornecimento e nas facilidades de localização e exploração de fontes minerais, incentivou, nas décadas recentes, o aperfeiçoamento de técnicas de tratamento e análise de dados, face ao crescente volume de informações adquiridas e, sobretudo, ao desenvolvimento de métodos exploratórios geológicos com características inovadoras em relação aos tradicionalmente em uso.

A capacidade do Sensoriamento Remoto de ampliar a visão humana além do seu limitado espectro visível de observação trouxe ao conhecimento do homem informações completamente desconhecidas sobre a imagem dos objetos - inerentes às suas propriedades físico-químicas, mineralógicas, composicionais, etc. - por meio da interação da energia eletromagnética com a superfície dos materiais. O reconhecimento da aplicação destas informações à pesquisa de recursos naturais foi o rápido passo da transposição do Sensoriamento Remoto ao nível orbital em uma escala global de recobrimento. Isto tornou possível observar o planeta através de uma mesma base de informação, o que resultou num imediato consenso de padronização de terminologia, simbologia, tratamento de dados, técnicas de análise e objetivos de pesquisa; fatores preponderantes para a consolidação de uma ciência, técnica ou método de trabalho.

Na exploração geológica com sensoriamento remoto, a aparente facilidade de análise de seus dados, em geral registrados fotograficamente, convergiu as pesquisas iniciais para estudos regionais, mapeamentos geológicos e suas correlações com depósitos minerais conhecidos, abordando, meramente pelo caráter sinótico das imagens, o aspecto da informação espacial. Os resultados destes estudos estruturais analisados com os de dados geofísicos, principalmente magnéticos, sísmicos e gravitacionais, evidenciaram a importância da integração de métodos para a pesquisa de exploração mineral.

Em paralelo, os interesses de pesquisa caminharam com igual intensidade na análise das propriedades multiespectrais dos dados, buscando compreender os significados das informações espectrais registradas pelos objetos nas diferentes partes do espectro eletromagnético. Neste enfoque confirmaram-se as possibilidades de discriminação litológica, de identificação de produtos de alteração hidrotermal de rochas e de anomalias geobotânicas, que diretamente podem constituir guias à exploração mineral. É nesta linha de pesquisa que o Sensoriamento Remoto moderno antevê seu maior potencial, e os esforços na área geológica concentram-se agora em descobrir como os principais minérios acumuladores de Zn, Cu, Pb, Fe, Cr, Al, U, Ni, etc. interagem espectralmente com a superfície das rochas, solos e vegetação. Os primeiros resultados animadores desta visão do Sensoriamento Remoto já se fizeram presentes nas modificações dos sensores dos satélites LANDSAT 4 e 5, adicionado de duas bandas espectrais geológicas no infravermelho, no andamento de pesquisas de imageamento termal ao nível orbital e nos recentes experimentos a bordo da espaçonave Challenger de sensores microondas (radares de visão lateral) com diferentes polarizações.

O futuro sucesso do Sensoriamento Remoto como uma técnica de exploração mineral dependerá em saber dominar o conhecimento das interações do objeto com a radiação eletromagnética neste amplo espectro de visão e de como integrá-lo adequadamente às várias técnicas exploratórias convencionais.

É mister que novas técnicas requeiram, às vezes, novas concepções no pensamento geológico.

2. BREVE RETROSPECTIVA

A definição convencional de Sensoriamento Remoto como uma técnica de obter certas informações de um objeto sem um contato físico direto com este, certamente seria aplicada desde a aquisição da primeira foto aérea em 1858. As fotos aéreas constituíram até pouco tempo na mais importante ferramenta de exploração geológica, devido à sua relativa facilidade de obtenção, alta resolução espacial e validade temporal ilimitada para mapeamentos. As fotos pancromáticas em preto e branco foram as mais utilizadas e o recurso de estereoscopia foi incontestavelmente a principal justificativa.

O emprego de fotos coloridas possibilitou uma outra dimensão de informação sobre as fotos em preto e branco, adicionando a cor como uma propriedade capaz de

diferenciar materiais considerados similares pelas suas características de reflectância em níveis de cinza. Os filmes infravermelhos em preto e branco e coloridos, sensíveis um pouco além da visão humana, passaram a exigir por sua vez o entendimento das interações de absorção e reflexão da luz com a superfície dos alvos. Muitos dos objetos identificados nos filmes infravermelhos exibiam índices de reflectância com intensidades muito mais elevadas que seus correspondentes níveis de reflectância no espectro visível de cores. O exemplo mais comum é o da vegetação, cujo pico de reflectância de luz verde, tal qual é enxergado, tem um valor oito vezes inferior ao nível de reflectância no infravermelho (10 a 20% de luz verde refletida versus 80 a 90% no infravermelho próximo). E assim, muitos outros materiais podem ser mais facilmente identificados, em regiões do espectro além do visível.

Esta constatação feita nos filmes infravermelhos despertou o interesse em ampliar as pesquisas no espectro eletromagnético até regiões tão distantes como a de microondas, usadas em sistemas radares. Uma consequência imediata destas pesquisas que se iniciaram em nível em laboratórios foi o desenvolvimento de equipamentos que pudessem registrar, em quase todo o espectro eletromagnético, imagens óticas. Então, surgiram os sensores não-fotográficos do tipo scanner capazes até de imageamentos múltiplos (multiespectrais), nos quais as emulsões fotográficas foram substituídas por diminutos cristais sólidos chamados detetores que geram um sinal elétrico, posteriormente convertido na imagem do objeto, que é proporcional às variações da intensidade da radiação eletromagnética que o sensibilizou. Foi desta concepção renovadora em registrar "fotograficamente" uma cena qualquer que o cognome Sensoriamento Remoto adquiriu projeção universal.

O Sensoriamento Remoto moderno está intimamente relacionado à pesquisa espacial e é quase impossível atualmente desassociar este termo da idéia de imageamento orbital por satélite. O lançamento do primeiro satélite da série LANDSAT em 1972, o primeiro a ser destinado à pesquisa de recursos naturais terrestres, é o marco inicial desta fase moderna do Sensoriamento Remoto.

O primeiro impacto causado pelas imagens de satélite foi a visão global de grandes áreas da superfície terrestre, propiciando através de uma mesma base de informação a correlação geológica entre áreas distantes e até mesmo continentais. Foram incentivados também os estudos multidisciplinares entre a Geologia, a Botânica, a Pedologia e a Geomorfologia, pois logo se percebeu da estreita dependência entre eles e das influências de um sobre o outro na interação com a energia eletromagnética. A necessidade deste conhecimento multidisciplinar tornou-se um requisito básico para qualquer especialista em sensoriamento remoto.

A versatilidade dos equipamentos sensores na obtenção simultânea de um volume considerável de dados tornou quase obrigatório o seu registro na forma digital. As fitas magnéticas, além de trazerem as vantagens de fidelidade de registro e reproduzirem os dados como de primeira geração, introduziram o computador como um elemento básico na análise de seus dados, com a conveniência de não exigir do especialista em Sensoriamento Remoto, amplos conhecimentos operacionais de "hardware" ou de "software". A contrapartida neste processo foi uma total guinada nos métodos convencionais de interpretação de fotos aéreas, passando os objetos da superfície terrestre a ser diagnosticados mais pelo comportamento de suas propriedades espectrais (tonalidade, cor, brilho, absorção, reflexão, albedo, propriedades dielétricas, etc.) do que pelas suas propriedades espaciais (forma e tamanho). Este caráter do Sensoriamento Remoto moderno o aproxima bastante dos métodos geofísicos de exploração.

As pesquisas através das técnicas de processamento digital e do uso das propriedades espectrais da superfície do material, como maneira de identificar, discriminar e classificar alvos naturais, são a atual base do Sensoriamento Remoto a qualquer finalidade a que se destina; embora ainda se veja hoje o uso frequente das imagens em preto e branco em papel, mais por uma contingência da disponibilidade de equipamentos analisadores automáticos por parte dos usuários.

O Brasil é particularmente favorável às aplicações de Sensoriamento Remoto por incluir domínios geológicos de grande extensão, diversidade de ambientes paisagísticos e áreas ainda bastante carentes de informações. O duplo recobrimento de todo o seu território por imagens de radar e satélite desde o início dos anos setenta é um privilégio de poucas nações, mas que não foi suficiente para atrair um número significativo de pesquisadores, mesmo no âmbito de ensino das universidades brasileiras. Este ceticismo ainda está presente no momento em que se inicia uma segunda geração de

sensores imageadores, mais sofisticados e bem mais superiores aos scanners da primeira geração. Alguns trabalhos bem sucedidos realizados em convênio com empresas particulares e que envolvem a integração de métodos de pesquisa e equipes de trabalho confirmam ser este o caminho mais rápido e prático para se firmar o Sensoriamento Remoto no meio geológico. Os esforços conjuntos devem ser envidados neste propósito.

3. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE OS DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Os dados de sensoriamento remoto consistem de informações da intensidade de do comprimento de onda, obtidas da detecção da radiação eletromagnética (REM) proveniente de um objeto, em um específico comprimento de onda. Para efetivamente usar as informações contidas na REM é preciso entender sua natureza e comportamento no sentido de saber como coletá-la e detectá-la, e, para extrair e decifrar as informações que um objeto transmite pela REM, é preciso entender os mecanismos de sua interação com a matéria.

Esta interação ocorre no nível macroscópico sendo conhecida como efeitos óticos geométricos, de relativa importância na região do microondas e nos níveis atômicos e moleculares, que são os principais responsáveis pelas feições espectrais de reflectância, absorvância e emitância, nas regiões do visível e infravermelho. Os níveis atômicos e moleculares envolvem basicamente o conceito de níveis discretos de energia, o que significa que uma transição para um nível mais alto é causada por absorção de REM, enquanto uma transição para um nível energético mais baixo é causada pela emissão de energia. Por ser o valor e o arranjo dos níveis de energia diferentes para cada material, a quantidade de energia que um determinado material pode absorver ou emitir será diferente de qualquer outro. A intensidade com que cada material absorverá, emitirá ou refletirá a REM que incide sobre eles definirá, num determinado comprimento de onda, a aparência espectral das imagens em sensoriamento remoto (variações dos níveis de cinza).

Todo este entendimento se torna mais fácil quando se divide o espectro eletromagnético útil ao sensoriamento remoto (0,4 μm violeta a 50 cm microondas) nas partes: visível (0,4 - 0,7 μm); infravermelho refletido (0,7 - 3,0 μm); infravermelho emitido (3 - 15 μm) e microondas (1 mm - 50 cm). Eles são ilustrados na Figura 1 junto com seus correspondentes mecanismos de interação. Em quaisquer destes intervalos os dados de sensoriamento remoto correspondem aos micrometros ou milímetros superiores das superfícies dos materiais por causa da alta opacidade e espalhamento característico dos materiais naturais. Nenhum sensor, ativo ou passivo, que usa a REM como fonte de informação, tem poder de penetração nos materiais sólidos.

Uma forma de discutir os processos de interação da REM com os materiais é através da análise do comportamento das feições de absorção de curvas espectrais de rochas, minerais, solos e vegetação obtidas em campo e laboratórios, e que na essência constituem a base para a coleta e detecção da radiação no intervalo 0,4 a 15 μm , que é considerada a região mais versátil e de uso atual em sensoriamento remoto. O grau de declividade das curvas espectrais, bem como a posição e intensidade das feições de absorção no espectro (picos negativos), é o indicador para discriminar os tipos de materiais nas imagens que correspondem às variações nas intensidades dos níveis de cinza. Como no visível e infravermelho sempre uma parte da radiação solar é absorvida em um determinado comprimento de onda, o processo de absorção determina a produção de feições ou bandas. Mesmo que o registro de radiação no visível e infravermelho seja baseado na energia refletida pelos materiais, a presença de feições de absorção determina reduções substanciais na intensidade do sinal registrado em um sensor remoto.

Em se tratando de rochas, minerais e solos, as feições espectrais são produzidas como consequência de processos eletrônico e vibracional. A razão destes processos ocorrerem em regiões espectrais diferentes, respectivamente no visível e infravermelho, vincula-se à exigência de quantidades de energia radiante diferentes (Figura 1).

As feições diagnósticas na reflectância espectral do visível até 1,0 μm são determinadas pela presença ou ausência de metais de transição (Goetz et alii, 1983). Os processos de transição eletrônicos envolvidos são principalmente os de transferência de carga e campo cristalino. O primeiro, que se refere à migração de elétrons entre íons vizinhos, é responsável pela abrupta queda na declividade da reflectância em direção ao azul, a partir de 0,5 μm , e por feições de absorção entre

0,85 e 0,92 μm que resultam em efeitos do campo cristalino, ou seja, em mudanças do nível energético dos elétrons dos orbitais d não-preenchidos (Figura 2). Tais feições são características de óxidos e óxidos hidratados de Fe e tornaram viável o mapeamento de zonas de alteração limoníticas em imagens MSS LANDSAT (Rowan et alii, 1977). A goe-tita e limonita, uns dos minerais mais comuns formados sob condições oxidantes como produtos de intemperismo de minerais que contêm ferro, são típicos de solos e rochas de ambientes tropicais e exibem tais feições diagnósticas. A presença de íon Fe^{2+} em oposição à do íon férrico é mais tipicamente evidenciada pela presença de uma ampla banda próxima a 1,0 e 1,1 μm (Hunt and Ashley, 1979). Outros óxidos como a ilmenita e magnetita mostram tipicamente um comportamento opaco e, conseqüentemente, quase não exibem feições espectrais (Figura 3).

Em contraposição, a região infravermelha refletida de 1 a 3 μm contém feições espectrais bem definidas, as quais são mais diagnósticas de composição dos minerais e das rochas do que das regiões do visível e do início do infravermelho. Todas as feições de absorção ditas neste intervalo espectral refletem exclusivamente processos de transição molecular vibracional dos grupos hidroxilas (OH) e são causadas por sobreton e pela combinação de tom do modo fundamental de vibração molecular. Entretanto, poucas moléculas fornecem as feições espectrais neste intervalo e, de longe, a mais comum envolve o modo estiramento O-H. A frequente ocorrência de OH no espectro dos materiais terrestres não é somente porque OH é parte da estrutura de um grande número de moléculas, mas porque a banda hidroxila aparece sempre que a água está presente.

No espectro de minerais e rochas, sempre que a água estiver presente, duas bandas de absorção aparecem, uma em 1,4 μm e outra em 1,9 μm . Mesmo que elas sejam comuns a todos os minerais que contêm OH, sua exata aparência e localização varia de mineral para mineral e alguma discriminação pode ser feita (Figura 4). Infelizmente, estas duas bandas coincidem com bandas de absorção d'água da atmosfera e só podem ser usadas em sensoriamento remoto por aeronave. Duas outras bandas são contudo bastante promissoras em sensoriamento remoto orbital: 1,6 μm e 2,1 a 2,4 μm . Elas têm interesse porque contêm feições bem definidas e altamente diagnósticas para filossilicatos $\text{Al} - \text{OH}$ e $\text{Mg} - \text{OH}$ (Figura 4), tais como argilas, micas e carbonatos. Elas têm sido usadas para identificar áreas ricas em argilo-mineral associados com zonas de alteração hidrotermal. Em geral, o espectro destes minerais exibe uma pronunciada elevação da reflectância em 1,6 μm , com uma acentuada queda que culmina em fortes feições de absorção entre 2,1 e 2,4 μm . As argilas ricas em Al produzem fortes bandas de absorção em 2,2 μm devido ao encurvamento $\text{Al} - \text{OH}$. A exata posição e a forma destas bandas variam para diferentes argilas aluminárias devido às sensistividades das vibrações aos ambientes cristalográficos. Se os sítios octaédricos nos filossilicatos são ocupados por Mg ao invés de Al , a banda de absorção será deslocada para 2,30 a 2,35 μm nas argilas magnesianas.

Além do infravermelho refletido, isto é, além de 3,0 μm , inicia-se a porção emissiva do espectro ou região termal, onde a propriedade medida é a radiação térmica emitida que expressa a temperatura de superfície do material, induzida pelo aquecimento solar diurno. Porém, devido ao baixo fluxo de energia solar incidente entre 3 e 5 μm e à forte opacidade atmosférica de 5 a 8 μm , somente a faixa termal emitida de 8 a 14 μm permite estudos de sensoriamento remoto com sistemas imageadores. Nesta região termal as manifestações são de vibração molecular do tipo estiramento Si-O e são diagnósticas para discriminar a maioria dos tipos de silicatos distinguindo-os de rochas não-silicáticas (Figura 5). A emitância de rochas silicáticas é fortemente sensível às variações do conteúdo de quartzo e mostra-se altamente favorável ao mapeamento de litologias de rochas silicáticas tais como quartzitos, monzonitos, qz. monzonitos, granitos, etc. (Kahle and Rowan, 1980); o que significa adquirir uma informação diretamente relacionada à composição química e à estrutura do material. As rochas silicáticas não são distinguidas no espectro visível e infravermelho refletido. Acima de 14 μm a atmosfera impede o uso de sensoriamento remoto, exceto para regiões de microondas.

Na região do microondas (> 1 mm) o sensoriamento remoto passa a usar principalmente sensores imageadores ativos, ou seja, ele emite sua própria fonte de radiação para iluminar o terreno. O que é registrado nas imagens são as características da difusão de ondas de radiofrequência pelos materiais da superfície terrestre. A interação do sinal emitido com a superfície do alvo é função de variáveis inter-relacionadas às características de rugosidade e geometria da superfície, de propriedades elétricas do alvo, de umidade e de outros parâmetros do sistema sensor e não são

relacionadas diretamente às propriedades de composição e estruturas químicas do material. Desta forma, estes sensores são mais úteis nos estudos estruturais. Os radares de banda X (3 cm) e banda K (0,86) são mais apropriados ao imageamento de regiões com superfícies mais uniformes e, por isso, ideais para regiões florestadas homogêneas, como a floresta Amazônica. Radares de banda L (25 cm) são mais apropriados para superfícies de relevos acentuados.

4. APLICAÇÕES GEOLÓGICAS

A tendência do Sensoriamento Remoto em se fixar no nível orbital, quando se inicia uma etapa de experimentos com sensores de segunda geração, é resultado da formidável contribuição dada à Geociência pelas imagens dos satélites LANDSAT. Com frequência pôde-se constatar, e às vezes com surpresa, que grande parte do globo é insuficiente ou no mínimo inadequadamente mapeada, mesmo em países desenvolvidos. A obtenção de dados em uma escala consistente com o tamanho das feições foi a principal razão para o largo uso do sensoriamento orbital e de radar de alta altitude em estudos regionais, principalmente de caráter estrutural e mapeamento geológico. Neste contexto as imagens demonstraram suas potencialidades em levantamentos de áreas carentes de mapeamento ou de difícil obtenção de dados de campo, mostrando uma ótima razão custo/efetividade e tempo/eficiência. Países como o Brasil, nos quais o estágio da execução da Cartografia Geológica (Salomão in Fernandes, 1983) é de 32,6% do território, na escala 1:250.000, 4,2% em 1:100.000, e 2% em 1:50.000, não podem em hipótese alguma prescindir-se dos dados de sensoriamento remoto.

A visão sinótica destas imagens evidenciou a presença de tipos de feições estruturais como lineamentos, comuns a todas as porções do planeta e, de certa forma, até então pouco suspeitadas, levando à retomada de estudos estruturais em áreas já bastante estudadas nas quais, em várias oportunidades, verificaram-se novas constatações sobre o controle de mineralizações.

Os estudos que envolvem mais o mapeamento geológico ou litológico, além das considerações normais de análise convencional de drenagem, padrões, textura, cobertura vegetal, etc. mostraram a importância do caráter espectral que as rochas transmitem através das variações de intensidades tonais nas imagens. A comprovação promissora desta nova abordagem nas técnicas exploratórias de Geologia exigiu do Sensoriamento Remoto um esforço para melhorar a caracterização espectral dos materiais geológicos nas imagens, o que já é possível com os dados do mapeador temático (TM) do LANDSAT 5, em órbita a partir de 01/03/84, e de outros breves sensores de alta resolução e estereoscopia.

Embora unidades litológicas nem sempre possam ser mapeadas diretamente em áreas vegetadas, muitas distinções podem ser feitas com base nos índices de densidades de cobertura e associações florísticas com alguns bons exemplos, os quais detêm padrões anômalos relacionados a concentrações minerais. As limitações de resolução espacial e espectral, impostas pelas imagens LANDSAT MSS, determinaram a seleção de novas bandas espectrais do TM e de outros futuros sensores, hábeis à análise das relações vegetação/rocha. Simulações com avião demonstraram excelentes resultados nesta área, onde a Geobotânica ou a Biogeoquímica de depósitos minerais usando os dados do TM está despertando grande interesse.

4.1. ANÁLISE ESTRUTURAL REGIONAL

As relações do tamanho, domínio e limites de homogeneidade de uma estrutura, em analogia com terrenos geológicos conhecidos e com modelos de deformação, deveriam fornecer o arcabouço correto para extrapolação das interpretações estruturais. Observações neste sentido, testadas com imagens em microescala de sensores remotos, levaram à reformulação de alguns conceitos morfotectônicos sobre a estabilidade dos cratons, geossuturas, bacias continentais, etc., talvez porque a observação da escala dos domínios estruturais é similar à escala de observação dos sistemas de sensoriamento remoto. Isto tornou-se a chave principal da aplicação do Sensoriamento Remoto em estudos estruturais de caráter regional. Da informação estrutural viu-se que as potencialidades do Sensoriamento Remoto como técnica para a exploração regional de recursos minerais seria tão útil como as convencionais existentes, dadas as características particulares das informações que essas potencialidades geram.

Na estratégia de exploração mineral sempre esteve claro que certos minérios são restritos a certos tipos de rochas e ambientes tectônicos, e a certos con

troles estruturais. Desta forma, a seleção de áreas para localização de depósitos minerais requer um estudo das anomalias ou indícios definidos de trabalhos regionais exploratórios. Conhecendo as potencialidades litológicas de uma área, pode-se suspeitar que uma dada feição estrutural, como uma zona de falha, poderá constituir-se num indício importante de mineralização. As facilidades das imagens de microescala, como as do LANDSAT e radar, em detectar numerosos lineamentos têm despertado a curiosidade de muitos estruturalistas, mesmo em regiões previamente bem mapeadas. Os lineamentos têm sido alvos de numerosos estudos para se deduzirem movimentos tectônicos, particularmente, em pesquisa de recursos minerais, pois muitos dos depósitos estão localizados ao longo de zonas de fraturas. Como os lineamentos nem sempre são facilmente diagnosticados em campo ou por meio de outros métodos, suas presenças em áreas mineralizadas podem adicionar novas informações sobre a distribuição dos depósitos ou sugerir extrapolações para áreas em continuidade às feições identificadas.

Goetz and Rock (1981) comentaram um destes fatos ocorrido em Nevada, onde durante muito tempo debateu-se a existência de faixas mineralizadas. Seis de oito grandes lineamentos delineados em imagens LANDSAT pareciam representar três grandes zonas estruturais que influenciaram a distribuição de depósitos minerais, das quais duas eram previamente conhecidas (Figura 6). Para surpresa geral, a terceira zona estrutural (lineamentos B, C e D) mostrou-se coincidente com "trends" de falhas, feições vulcânicas e concentrações de depósitos minerais, cujas relações não eram anteriormente suspeitadas. Isto enfatiza a importância da integração da análise dos lineamentos com dados de campo e dados geofísicos e geoquímicos regionais. Por exemplo, um lineamento pode representar uma zona de cisalhamento que eventualmente possui uma resistividade diferente das áreas próximas, produzida por cristalização ou calcificação devido às percolações de fluxo dentro da falha. Simples e rápidos serviços de mapeamento de resistividade através da suspeita estrutura poderão confirmar a existência do lineamento ou da falha. Isto pode ser um método simples e útil em pesquisa de água subterrânea de regiões semi-áridas ou áridas, em geral carentes de afloramentos, onde falhas frequentemente controlam os depósitos aquíferos subterrâneos.

A integração do sensoriamento remoto com dados geológicos, geofísicos e geoquímicos é bastante oportuna, dada a dificuldade de identificar os lineamentos no campo ou de explicar certos padrões espectrais anômalos, observados em imagens multiespectrais. Várias técnicas de processamento de imagens digitais (realçamento, filtros, transformações geométricas, etc.) podem ser aplicadas com vantagens sobre a análise convencional dos variados dados de mapas geológicos, geofísicos, geoquímicos e topográficos. Todos estes tipos de dados e formatos podem ser facilmente processados para uma base comum de escala e projeção em formato de imagem digital, que poderão em display de sistemas digitais ser livremente combinados para análises de correlação. As etapas desta integração podem ser genericamente mostradas num fluxograma (Figura 7), baseado nos trabalhos de correlação de dados de sensoriamento remoto de Fisher et alii (1978), Prelat e Lyon (1978), Guinness et alii (1983) e outros.

Uma significativa vantagem do processamento digital de imagens de conjuntos múltiplos de dados é a habilidade de expor as imagens em uma variedade de combinações para interpretação. Depois que os dados forem transformados numa base comum, eles podem ser superpostos, codificados em cores, manipulados por funções numéricas e ampliados. Isto permite ao analista focar as áreas importantes ao seu estudo e fazer rápidas comparações.

Talvez uma das mais frequentes aplicações de dados de sensoriamento remoto à pesquisa mineral tem sido na prospecção de hidrocarbonetos. Em bacias continentais mais jovens, onde a presença de perturbações estruturais são mais patentes, as imagens LANDSAT constituem um método de prospecção quase que direto. Dificuldades maiores são encontradas nas bacias paleozóicas como as brasileiras, as quais exigem a elaboração de metodologias específicas de interpretação. Recentemente, Soares et alii (1981, 1982) e Miranda (1984) formularam um método de análise morfoestrutural a partir de informações extraídas de imagens LANDSAT e de radar para a detecção de áreas estruturalmente favoráveis à acumulação de hidrocarbonetos. O método enfatiza uma análise morfoestrutural da rede de drenagem, o qual consiste basicamente na interpretação das formas e intensidade de estruturação dos elementos anelares, assimétricos e radiais, indicativos de estruturas dômicas e trapas estruturais. Aplicado nas bacias do Paraná e Amazonas, constatou-se a existência de relações preferenciais entre os máximos de frequência dos eixos maiores das anomalias estruturais dômicas e os "trends" de lineamentos, o que pode indicar relações genéticas e de idade. A origem deste método foi motivada pela pouca eficiência dos métodos geofísicos, principalmente sísmica, nas áreas basálticas da bacia do Paraná.

4.2. DISCRIMINAÇÃO LITOLÓGICA COM ÊNFASE À PESQUISA MINERAL

Os dados de sensores multiespectrais podem dispor de imagens em bandas selecionadas, favoráveis à caracterização de diferentes tipos litológicos. As técnicas de processamento digital podem realçar mais ainda as propriedades diagnósticas de discriminação das rochas, gerando combinações coloridas de n tipos a partir de imagens originais e transformadas. As propriedades analisadas, inerentes às imagens para discriminação das rochas, são o brilho, a radiância e as relações espaciais das formas. O conhecimento básico das propriedades espectrais discutidas na Seção 3 é pré-requisito para compreender as variações de níveis de cinza e cores nas imagens e relacioná-los às correspondentes variações, às vezes sutis, das litologias.

Muitas variáveis interpodem-se na extrapolação ou identificação de litologias, tais como os efeitos atmosféricos, variações de iluminação da cena, variações de relevo, cobertura vegetal, grau de alteração, etc., o que determina que as análises e interpretações sejam restritas a cada imagem.

Devido ao fato de os dados de sensoriamento remoto corresponderem aos micrômetros da superfície dos materiais, o índice de sucesso na discriminação litológica é maior em regiões com limitada cobertura vegetal (30-40%). Felizmente, muitas áreas alteradas hidrotermalmente expõem esta densidade de vegetação devido às condições de solos ácidos, o que as tornam, pelas suas potencialidades minerais, nos principais alvos de pesquisa em Sensoriamento Remoto. As tentativas são feitas para discriminar rochas não-alteradas das rochas alteradas e as diversas variações destas, face às suas associações com minérios, e para reconhecer áreas de rochas hidrotermalmente alteradas, não-mapeadas previamente.

Os recentes trabalhos de Abrams et alii (1983) e Podwysocki et alii (1983) demonstraram a expectativa promissora que está se formando em torno dos dados do mapeador temático do LANDSAT-5, cujas bandas com melhores resoluções espectral e espacial comprovaram alta eficiência em simulações com aeronave.

Abrams et alii (1983) compararam as imagens MSS do LANDSAT com os dados que simulam o mapeador temático para avaliar a capacidade espectral de ambos sistemas em separar litologias e, principalmente, produtos de alteração hidrotermal. Uma das áreas testes selecionadas foi o distrito de Silver Bell em Tucson, Arizona, onde um padrão de alteração hidrotermal e de mineralização pirítica de Cu e Mo constitui uma zona profilítica, com uma mais intensa alteração potássica e filítica próximas às minas, numa extensão de 13 x 13 km. Geologicamente a área consiste em rochas vulcânicas eruptivas da orogênese Laramide. Utilizando composições coloridas de imagens "ratios"¹, cada uma das unidades geológicas mapeadas foi separada através das diferenças dos padrões de cores. Subdivisões foram feitas para certas unidades, as quais correspondem a vários tipos de alterações. A composição colorida formada pelos "ratios" 4/5, 5/6 e 6/7 do MSS LANDSAT indicou várias áreas de rochas com óxidos de ferro, correspondentes a rochas não-alteradas, rochas limoníticas ou hematíticas e rochas alteradas associadas com depósitos minerais. A limitada resolução espectral das imagens LANDSAT MSS impediu a separação de rochas alteradas das não-alteradas com óxido de ferro.

Combinações de imagens simuladas com os "ratios" das bandas 0,83/1,65 μm , 0,66/0,56 μm e 1,65/2,2 μm retrataram áreas ricas em óxido férrico e áreas mais ricas em argila devido à presença da banda férrica no violeta e à presença de bandas de absorção de minerais hidróxidos próximo a 2,2 μm , respectivamente. A zona principal de alteração (13 x 13 km) foi quase que perfeitamente delineada, contudo não se pôde discriminar a zona de alteração potássica da filítica. Áreas de alteração periferica foram identificadas, embora com limites pobres, o que reflete que a distribuição das argilas minerais é dispersa, com transição para rochas frescas. Portanto, áreas que são interpretadas como potencialmente alteradas em imagens LANDSAT MSS poderiam ser eliminadas com base na falta de bandas de absorção de minerais hidratados nas imagens simuladas. O realce no contraste das unidades litológicas tende, às vezes, a enfatizar certos detalhes estruturais.

Com propósitos similares ao de Abrams et alii (1983), Podwysocki e Seegal (1983) analisaram imagens "ratios" de bandas 1,6/2,2 μm , 1,6/0,48 μm e 0,67/1,0 μm

¹ Imagens "ratios" correspondem às imagens obtidas da divisão de canais.

para enfatizar contrastes espectrais que existem, respectivamente, para rochas argilíticas versus não-argilíticas, rochas com óxido férrico versus rochas sem esses óxidos e rochas versus vegetação. A área teste foi a de Marysvale em Utah, localizada dentro de um grande campo vulcânico com muitos locais alterados por soluções ácidas hidrotermais, algumas delas contendo depósitos minerais econômicos. A combinação em cor dos três "ratios" permitiu a separação de rochas alteradas de rochas não-alteradas e a separação de ambos os tipos de rochas da vegetação. Algumas áreas de rochas alteradas previamente não-mapeadas foram detectadas. Rochas hematiticamente alteradas com falta de um significativo conteúdo de argila mineral foram confundidas com rochas com óxido ferro férrico inalterado.

Os resultados de ambos os estudos confirmam as bandas 1,6 e 2,2 μm como bastante úteis na exploração mineral e permitem informações diretas da composição química grosseira da rocha.

No Brasil, os dados MSS do LANDSAT processados em computador (análise multiespectral, I-100) têm fornecido alguns resultados animadores na discriminação litológica e, diretamente, na pesquisa mineral. Em 1979, a Odebrecht, com intenção de acrescer suas reservas de ilmenita da região de Floresta, PE, testou junto com o INPE a possibilidade de uso de técnicas de classificação automática, a fim de verificar as alternativas para a seleção de áreas para prospecção. Utilizando como área de treinamento uma jazida conhecida nas proximidades da Fazenda Exu, Paradella et alii (1979) aplicaram sobre as imagens MSS da área um programa de classificação supervisionada, com base no critério de máxima verossimilhança entre classes escolhidas interativamente pelo usuário. A classificação abrangeu cerca de 400 km^2 analisados na escala 1:80.000 e revelou mais de 600 áreas alarmadas com características semelhantes às áreas de treinamento. Num espaço de quatro meses quase uma centena de áreas alarmadas havia sido verificada em campo, resultando na identificação de quatro jazidas com teores médio a pobre (18% a 5% de TiO_2). As áreas alarmadas sempre correspondiam a áreas de clorita xistos com magnetita e ilmenita, meta-peridotitos e orto-anfibolitos, capeadas por solos vermelhos fortemente oxidados. Áreas de para-anfibolitos menos favoráveis à mineralização e também com solos avermelhados não foram alarmados. A ausência de magnetita nos para-anfibolitos deve ter sido o fator principal de sua separação com os orto-anfibolitos mineralizados, pois este mineral tem o poder de reduzir drasticamente o nível de reflectância no visível e infravermelho, em relação à reflectância de outras rochas.

Paradella (1983) estudou também a eficiência das imagens LANDSAT MSS na discriminação de unidades litológicas, na complexa área do Vale do Curuçá. Os resultados obtidos através de composições coloridas de imagens originais e imagens "ratios", componentes principais e análise multiazonal, foram condizentes com os mapeamentos prévios em escala 1:50.000 e indicaram ainda a individualização de uma unidade gnáissica, uma área de cataclasitos junto ao sienito da Serra Redonda, a cartografia correta de uma unidade migmatítica e delimitação de áreas filíticas e de calcários secundários (Formação Caatinga). As composições coloridas mostraram também variações de cores entre pequenos corpos de quartzito ferruginoso e mafitos-ultramafitos e, pelo menos, quatro variações de padrões tonais entre estes últimos foram detectadas, apesar da reduzida dimensão dos corpos em relação ao elemento de resolução das imagens (80 x 80 m). Infelizmente a correlação de tons com dados de campo só foi comprovada através das variações de cores de solos. De qualquer forma abre-se uma grande perspectiva para futuros testes com os dados do TM (resolução 30 m), a fim de estudar um possível zoneamento dos 200 ou mais corpos de mafitos-ultramafitos do Curuçá, a partir de características espectrais relacionadas às suas variações litológicas e, principalmente devido às potencialidades que possuem como áreas de prospecto de cromo, níquel e cobre.

4.3. DETECÇÃO DE ANOMALIAS GEOTÉCNICAS

Índices de cobertura vegetal superiores a 40% impõem sérias limitações na identificação do "background" geológico, a menos que ocorra uma distribuição florística seletiva em relação aos tipos litológicos. O mascaramento do terreno pela vegetação é presenciado principalmente no visível e infravermelho próximo, devido ao fato de as feições de absorção entre 0,4 a 0,7 μm serem muito mais intensas do que as observadas em rochas e solos no mesmo intervalo, além também da presença de um patamar de reflectância uniforme e elevado no infravermelho.

As feições de absorção são devidas à clorofila a e b com bandas centrais aproximadamente em 0,48 μm e 0,68 μm , a última banda situada no limite para a rápida ascensão da reflectância do patamar infravermelho, limite este conhecido como "red edge" (borda do vermelho/infravermelho). Uma suave feição de reflectância é observada entre 0,52 a 0,60 μm (pico em 0,55 μm), responsável pela aparência da cor verde da vegetação. Quase todos os tipos de vegetação verde possuem um comportamento espectral bastante similar e qualquer variação brusca deste comportamento está directamente relacionada a variações na concentração e ambiente celular da clorofila. Estas mudanças refletem-se na posição e intensidade das bandas de absorção e do "red edge", e podem ser ocasionadas pelos estágios de senescência (ciclo fenológico da planta) ou pelo seu estado de saúde (Figura 8). A saúde de uma planta pode ser alterada por fenômenos de toxidez mineral que afeta a pigmentação das folhas (efeito esclerose) e/ou seu ciclo evolutivo (alterações na época de floração, reprodução, crescimento, etc.). Ao Sensoriamento Remoto interessa detectar os efeitos destes estresses e tentar estabelecer as relações existentes em eventuais anomalias geobotânicas.

As alterações espectrais por estresse geoquímico são mais comuns no intervalo de 0,55 a 0,75 μm (Collins et alii, 1983) e a principal feição observada é um pequeno deslocamento da "red edge" em direção aos comprimentos de onda menores (azul), o que se convencionou denominar de "blue shift". Esta constatação tem sido testada em conhecidas áreas mineralizadas através de técnicas de sensoriamento remoto por avião e de laboratório, dada a necessidade de instrumentos de alta resolução espectral.

Os dados MSS LANDSAT são insuficientes para detectar a maioria das anomalias geobotânicas devido a dois fatos: o elemento de resolução no terreno (80 x 80m) dificulta a obtenção de um número suficiente de elementos de resolução só sobre a área anômala, e, segundo, as bandas espectrais têm larguras muito superiores aos abruptos deslocamentos médios das feições provocadas por estresse, o que significa que vários tipos de feições de propriedades distintas são integradas dentro daquela banda espectral. Os sistemas fotográficos também têm esta última característica negativa, além de outras não-controláveis. Apesar disto algum sucesso relativo foi obtido por Raines et alii (1978) e Lyon (1975) ao detectar anomalias geobotânicas de urânio e molibidênio, respectivamente.

O efeito "blue shift" foi bastante investigado por Chang and Collins (1983) utilizando técnicas laboratoriais para confirmar a possibilidade de exploração mineral biogeofísica por avião. Estes autores basearam seus estudos na correlação entre o aumento da magnitude do "blue shift" e a eventual clorose e morte da planta com uma quantidade de metais tóxicos no solo. A Figura 9 ilustra este efeito do "blue shift", observado em uma área mineralizada através de espectrômetro colocado em avião. O mesmo efeito foi observado no espectro de sorgo cultivado em laboratório com controle de dosagem tóxica de sulfato de cobre (Figura 10). O deslocamento espectral medido por técnicas especiais (derivada e em forma de onda) foi de 0,74 para planta não-estressada e 0,70 μm para planta fortemente estressada. Esta diferença máxima de 0,04 μm é quase compatível com a largura de algumas bandas do visível do TM-5. Notivos técnicos ou outros impediram o posicionamento de uma banda "blue shift" neste satélite.

Um resumo das análises espectrométricas feitas por Chang and Collins (1983) sobre os efeitos do "blue shift", como diagnóstico de estresse geoquímico controlado em laboratório, é mostrado na Figura 11, o qual apresenta os deslocamentos do "red edge - blue shift" de acordo com as variações de ppm dos metais. O mais forte efeito de estresse foi provocado por Cu e Zn, mesmo para os menores valores de ppm. O manganês induziu o estresse somente quando em concentrações muito altas, e os demais metais tiveram uma tendência de permanecerem no limite normal, sem apresentar efeitos de estresse. Um interessante resultado apontado por esses autores é que o efeito combinado de sulfeto de chumbo e ferro com sulfato de zinco e cobre torna-se neutro mesmo em altas concentrações. Somente uma planta entre quatro analisadas mostrou estresse.

Usando dados de aeronave, Collins et alii (1983) confirmaram essas feições de estresse induzidas por metais através de estudos com espectrômetros sobre as áreas mineralizadas de cobre de Cotter Basin em Montana e Spirit Lake em Washington, indicando a banda de 0,7 a 0,76 μm como a única região espectral onde as mudanças induzidas da clorofila poderão ser detectadas.

Certamente muitos estudos deverão ser complementados para investigar todas as variáveis que afetam o imageamento por satélite voltado para o propósito de detecção de anomalias geobotânicas. Os problemas principais são de interferência atmosférica, condições de iluminação de cena, tamanho do elemento de resolução, ruído de "background" e falta de um equipamento imageador de alta resolução. A repetitividade de imageamento por satélite oferece a grande vantagem de se poder acompanhar o estado fenológico de uma planta e escolher a época mais favorável para detectar qualquer alteração na vegetação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMS, M.J.; BROWN, D.; LEPLEY, L.; SADOWSKI, R. Remote Sensing for porphyry copper deposits in Southern Arizona. Economic Geology: 78, 4. 591-595. 1983.
- CHANG, S.H.; COLLINS, W. Confirmation of the airborne biogeophysical mineral exploration technique using laboratory methods. Economic Geology: 78, 4. 1983. p. 723-736.
- COLLINS, W.; CHANG, S.H.; RAINES, G.; CHWEEV, F.; ASHLEY, R. Airborne biogeochemical mapping of hidden mineral deposits. Economic Geology: 78, 4. p. 737-749. 1983.
- FERNANDES, F. Serviço geológico brasileiro: uma necessidade? Ciência da Terra: 8. p. 33-34, 1983.
- FISHER, W.A.; ORR, D.G. An example of the merging of LANDSAT, topographic and aeromagnetic data in a geologic and hydrologic study of a karst region. Symposium on Remote Sensing of Environment, 12. Ann Arbor, 1978. p. 805-824.
- GOETZ, A.F.H.; ROWAN, L.C. Geologic Remote Sensing. Science, 211:781-791, 1981.
- GOETZ, A.F.H.; ROCK, B.N. Remote Sensing for Exploration: an overview. Economic Geology: 78, 4. p. 573-590, 1983.
- GUINNESS, F.A.; ARVIDSON, R.E.; LEFF, C.E.; EDWARDS, M.H.; BIRDSCHALLER, D.L. Digital image processing application to analysis of geophysical and geochemical data for southern Missouri. Economic Geology: 78, 4. p. 654-663, 1983.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, S.W.; LENHOFF, J.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides. Modern Geology 2: 3-205. 1971.
- HUNT, G.R.; ASHLEY, R.P. Spectra of altered rocks in the visible and nearinfrared. Economic Geology: 74. p. 1613-1629. 1979.
- KHILF, A.B.; ROWAN, L.C. Evaluation of multispectral middle infrared aircraft images for lithologic mapping in the east Tintic Mountains, Utah. Geology: 8. p. 234-239. 1980.
- MIRANDA, F.P. Sistemática de Interpretação de dados de sensoriamento remoto na prospecção de hidrocarbonetos. Tese de Mestrado. INPE 1984. 165 p.
- PARADELLA, W.R.; MENESES, P.R.; MATOSO, S. Interpretações automáticas de dados LANDSAT na pesquisa de ilmenita de Floresta, PE. In: Seminário Brasileiro sobre Técnicas Exploratórias em Geologia, 2. Gravatal, SC, 1979. v. 1. p. 307-317.
- PARADELLA, W.R. Discriminação de unidades litológicas no baixo vale do rio Curacá (Bahia), através de malces por processamento digital de dados MSS-LANDSAT 3. Tese de doutoramento em Geologia. USP, 1983, 233 p.
- PODWYSOCKI, N.H.; SIEGAL, D.B.; ABRAMS, M.J. Use of multispectral scanner images for assessment of hydrothermal alteration in the Marysvale, Utah mining area. Economic Geology: 78, 4. p. 675-687, 1983.
- PRELOT, A.E.; LYON, R.J.P. Simultaneous use of geological, geophysical and LANDSAT digital data in uranium exploration. Remote Sensing of Environment: 8, 3. 1975.
- ROWAN, L.C.; GOETZ, A.G.H.; ASHLEY, R.P. Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near-infrared multispectral images. Geophysics: 42. p. 522-535. 1977.
- SIEGAL, B.S.; GILLESPIE, A.R. Remote Sensing in geology. New York, NY, John Wiley, 1980.
- SOARES, P.C.; MATTOS, J.T.; BALIEIRO, M.G.; BARCELLOS, P.E.; MENESES, P.R.; GUERRA, S.M.S.; CSORDAS, S.M. Análise morfoestrutural regional com imagens de radar e LANDSAT na Bacia do Paraná. In: Simpósio Regional de Geologia, 3. Curitiba, 1981, v. 1, p. 201-216.

SOARES, P.C.; BARCELLOS, P.E.; CSORDAS, S.M.; MATTOS, J.T.; BALIEIRO, M.G.; MENESES, P.R. Lineamentos em imagens de LANDSAT e radar e suas implicações no conhecimento tectônico da bacia do Paraná. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto 2. Brasília, 1982, v. 2. p. 143-153.

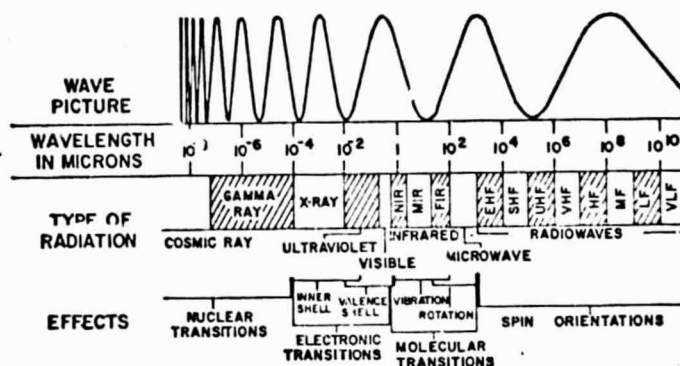


Fig. 1 - Espectro eletromagnético mostrando os tipos de radiação e os efeitos que produzem as feições espectrais em cada intervalo.

FONTE: Siegal and Gillespie (1978), p. 11

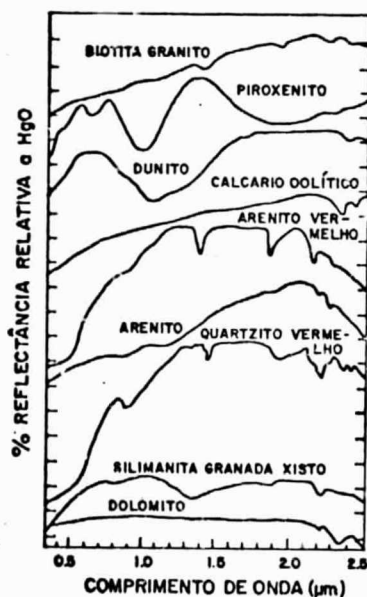


Fig. 2 - Curvas espectrais de alguns exemplos comuns de rochas sedimentares, metamórficas e ígneas.

FONTE: Siegal and Gillespie (1978)

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

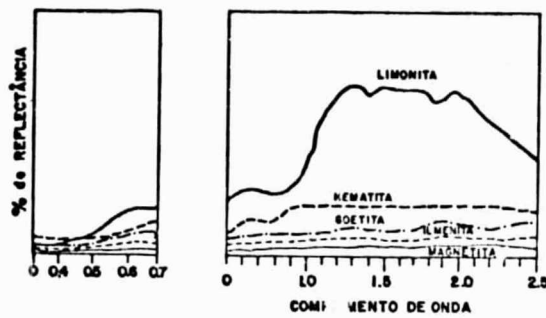


Fig. 3 - Curvas espectrais de minerais hi
dróxidos e óxidos de Fe.

FONTE: Hunt et alii (1971),
p. 201 e 202.

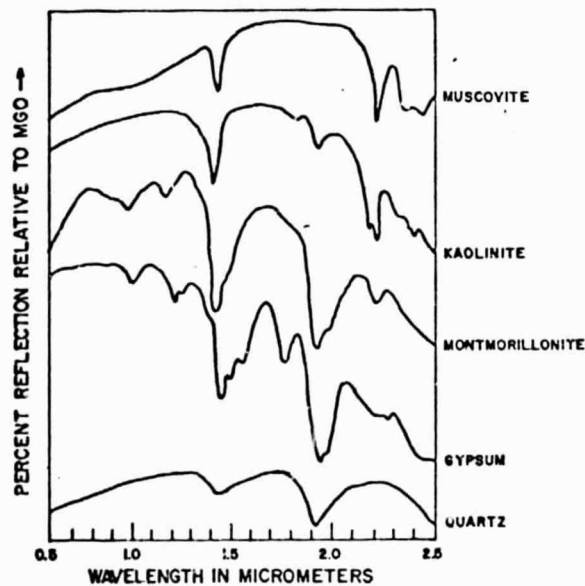


Fig. 4 - Bandas de absorção de minerais envol
vendo o grupo hidroxila (muscovita e
kaolinita) e água em várias formas
(montmorilonita, gipso e quartzo).

FONTE: Siegal and Gillespie (1978),
p. 31.

OF POOR QUALITY

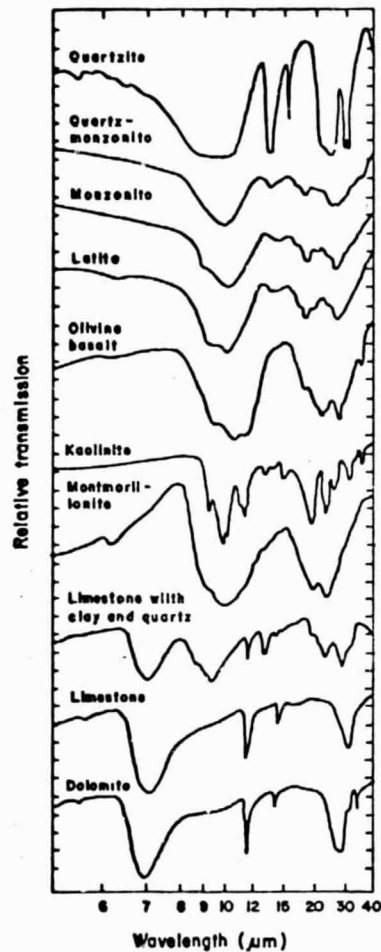


Fig. 5 - Bandas típicas de discriminação espectral de minerais silicáticos no intervalo do infravermelho emitido.

FONTE: Goetz et alii
(1981), p. 783

Origem
OF POOR QUALITY

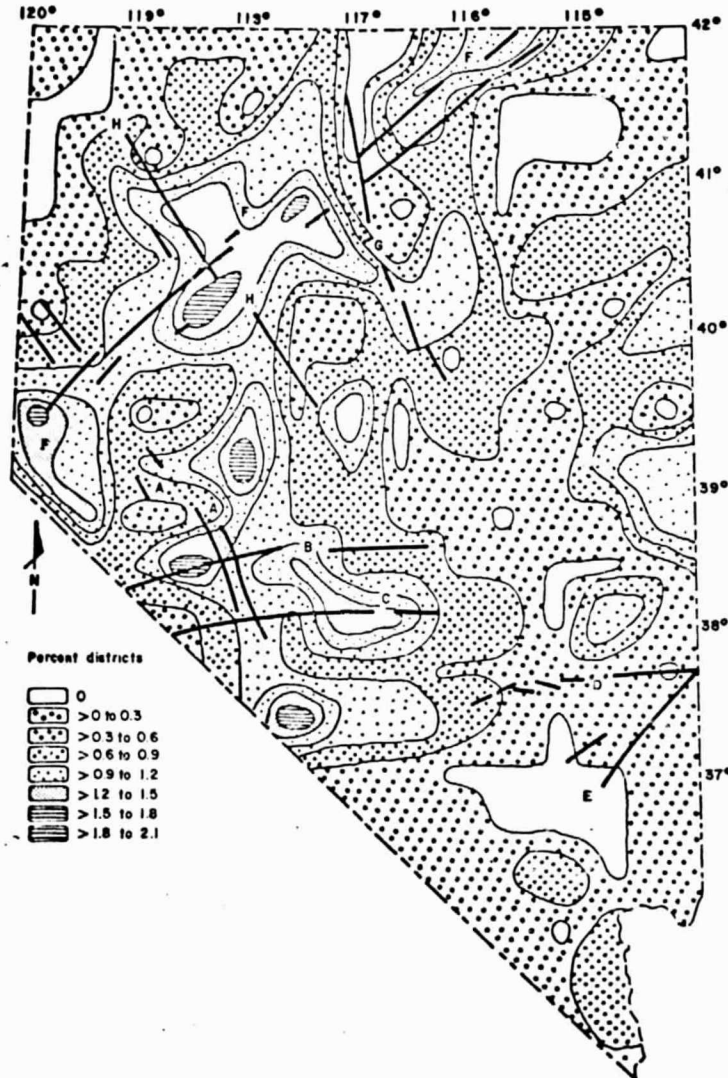


Fig. 6 - Faixas estruturais mineralizadas e suas correspondências com lineamentos identificadas em imagens LANDSAT.

FONTE: Goetz et alii (1981), p. 784.

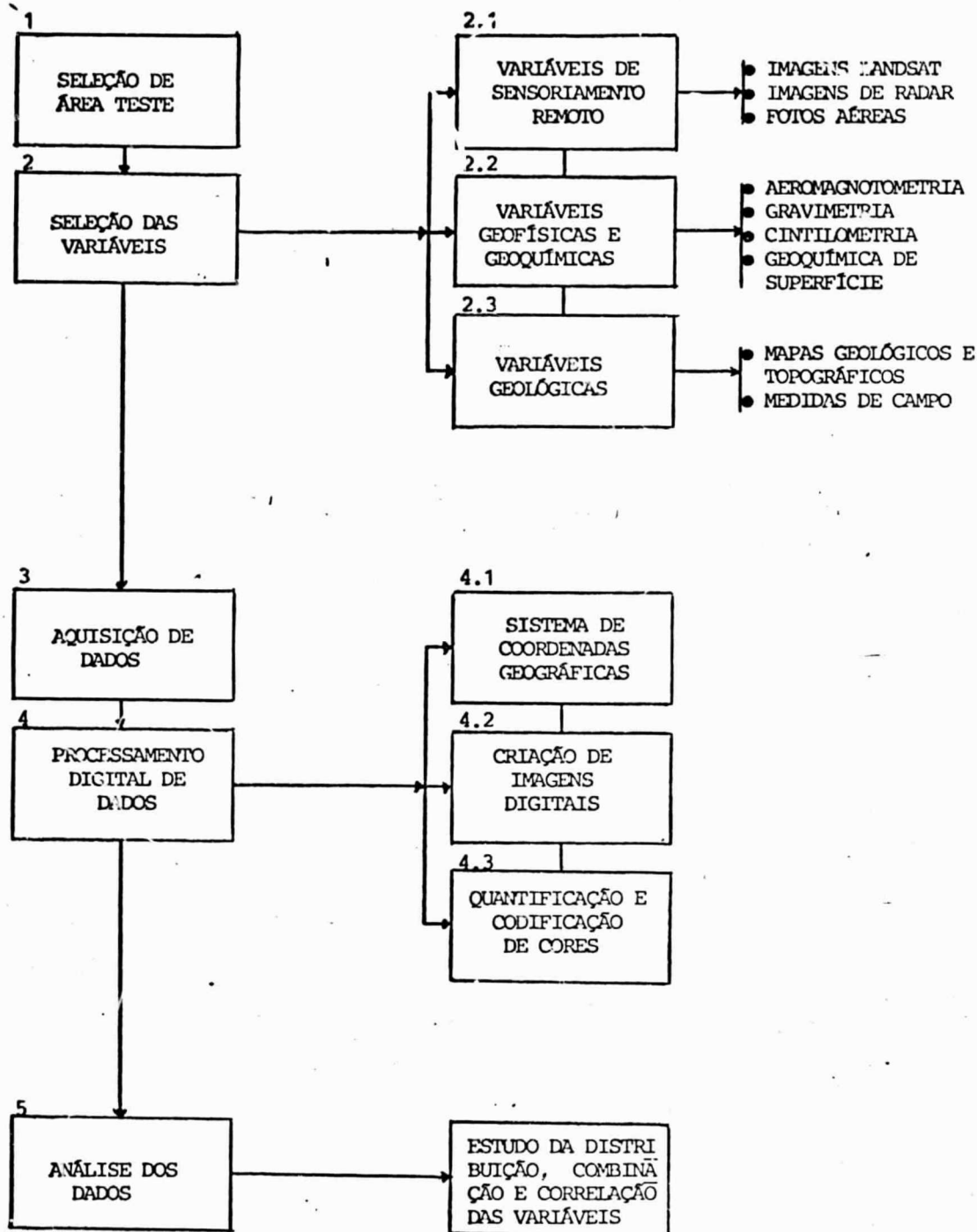


Fig. 7 - Fluxograma com as principais etapas necessárias à integração de dados múltiplos com dados de sensoriamento remoto.

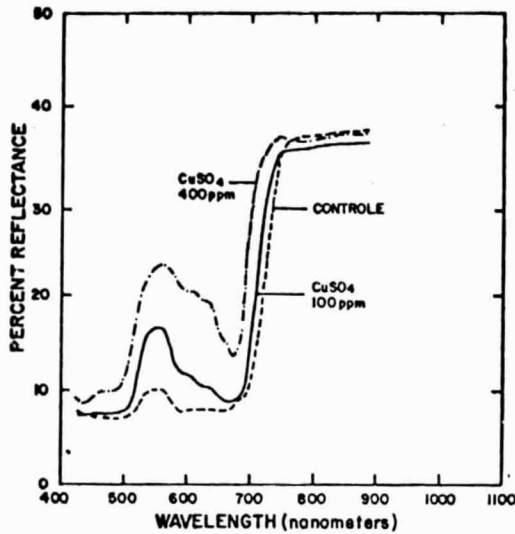


Fig. 8 - Espectro de reflectância de folhas de sorgo cultivados em laboratório. Os efeitos da toxidez por metais são óbvios na mudança da curva normal da planta.

FONTE: Goetz et alii (1983), p. 728.

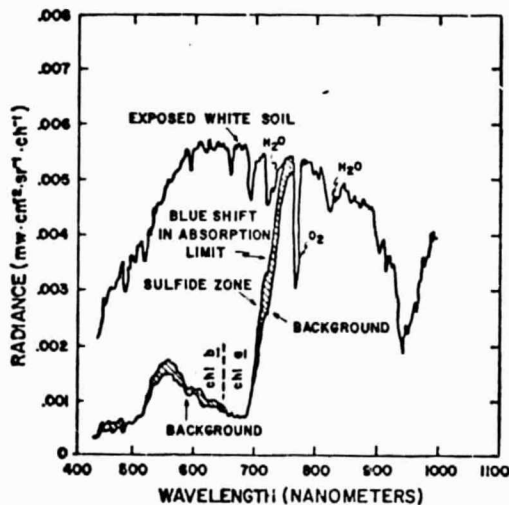


Fig. 9 - Área hachurada indica o efeito "blue shift" da curva espectral de vegetação em área mineralizada.

Observar o deslocamento da curva normal da vegetação em direção aos comprimentos de onda menores devido à presença de ingestão de metais.

FONTE: Goetz et alii (1983), p. 727.

